

浮游藻类是海洋中最重要的初级生产者，其光合作用产物是整个食物链的物质和能量基础。它们生产能力的大小，决定着海洋生物的盛衰。因此，在海洋生物资源的开发中，对海洋初级生产力的调查研究，占有重要的地位。测定初级生产力方法之一，就是测定海洋中叶绿素浓度。但是，传统测定方法十分繁琐，难以跟踪海洋中瞬息万变的情况，无法进行大尺度的快速测定。所以就有必要寻求新的方法。本刊1977年第一期《海洋科学新动向》一文中，在谈到测定海洋初级生产力时，曾呈奎教授指出：七十年代以来，国外采用了卫星遥感等新技术，测定海洋中叶绿素浓度，计算海洋初级生产力，大大地加速了海洋初级生产力的研究。

那末，用什么方法来测定海洋中叶绿素的浓度呢？浮游藻类少，水色发蓝；浮游藻类多，水色发绿。这种习以为常的现象，正是卫星遥感叶绿素的主要依据。含有叶绿素的藻类，引起海水光谱反射率的变化，用卫星传感器，测定这种光谱效应的信号，经过各种计算和修正，就可以计算出海水中叶绿素的含量。

本文从海洋叶绿素的光谱效应，大气层数据的修正和表观轨道对比度等几个方面，对这种测定海洋叶绿素的技术作简略的介绍。

一、海洋叶绿素的光谱效应

叶绿素-a浓度不同的海水，颜色是不一样的。也就是说，光谱反射率是不一样的。精确地测量和计算不同叶绿素-a浓度海水的光谱反

中国科学院海洋研究所
平仲良



射率，按图1所示的程序进行。

具体步骤如下：

1. 本底水

选择一种清澈的蓝色的海水作为本底水。这是一种很贫瘠的海水，叶绿素-a含量很低，浓度为0.112毫克/米³。

用水下光谱辐照度计测量本底水的光谱反射系数和光谱衰减系数。光谱反射系数反映本底水散射光线的能力，而光谱衰减系数反映本底水对光线的吸收能力。两个系数完整地反映了本底水的光学性质，决定了光线在水中的传播能力。

图2表示本底水的水下光谱反射率。图3表示辐照度的光谱衰减系数。图上的曲线已经平滑加工，除去了数据中的高频噪音。

然后，根据图2、3的数据，用电子计算机计算出本底水的光谱反向散射系数和光谱吸收系数。其结果示于图4和图5。这两个系数与叶绿素-a的浓度有线性关系。

2. 样品

选择九种常见的大洋型和沿岸型的浮游藻类的样品，在实验室作活体培养。这九种藻类是：1. 新月菱形藻(*Nitzschia closterium*)；2. 北方柱链藻(*Lauderia borealis*)；3. 沟环藻(*Gymnodinium species*)；4. 单边金藻(*Monochrysis lutheri*)；5. 矮小环藻(*Cyclotella nana*)；6. 中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)；7. 多边膝沟藻(*Gonyaulax polyedra*)；8. 环沟藻(*Gymnodinium splendens*)；9. 颗石藻(*Coccolithus huxleyi*)。

* 本文承曾呈奎教授、吴超元教授审阅，写作过程得到周百成同志帮助，特此致谢。

各种藻类的光谱漫反射率和光谱漫射光密度用分光光度计测量。以颗石藻为例，它的数据示于图6、7。

然后用电子计算机计算出单位浓度样品的光谱反向散射系数 b^* 和光谱吸收系数 a^* 。颗石藻的数据示于图8、图9。

然后，乘上适当的浓度系数，分别加到本底水相应的系数上。

最后，输入电子计算机，计算各种藻类、不同浓度的水下光谱反射率。

颗石藻四种叶绿素-a浓度的水下光谱反射率 R_∞ 示于图10。

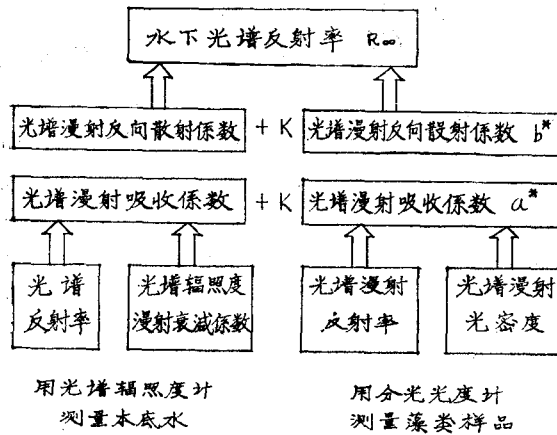


图1 水下光谱反射率的计算程序

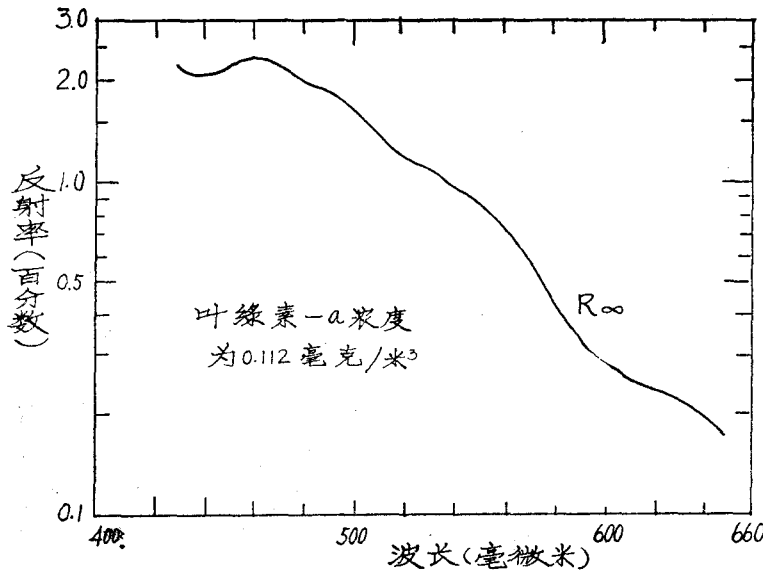


图2 清沱的深海水的水下光谱反射率

3. 海洋叶绿素的光谱效应

水下光谱反射率的物理意义是：水面下，有一个非常厚的水层。从天空向下辐射的光线，透过水面，与水体相作用，向上折回一个辐射能量。在每一波长处，其辐射强度与入射的辐射度之比的 π 倍。水下光谱反射率包含水的颜色信息。

扩散材料的光学理论指出：在大型的均匀的从光学角度来说是无限深的海水中，每一波长处的反向漫散射系数 b^* 和漫射吸收系数 a^* 的比值决定光谱漫反射率。表达形式如下：

$$R_\infty = \frac{(b^*/a^*)}{1 + (b^*/a^*) + \sqrt{1 + 2(b^*/a^*)}}$$

通常 $b^*/a^* < 1$

将任何种类的浮游藻类加入水中，光谱反射率在绿区上升，在蓝区下降。因此，富有浮游藻类的海区，呈绿色。绿色上升的原因，是浮游藻类表面披有一层半透明的甲壳。不同种的浮游藻类，甲壳可能是钙质的，硅质的，也可能是纤维质的。这些甲壳，在可见光区增强海水的散射能力，使方程中 b^* 值提高。在光谱的绿区，对绿光吸收很小，并未因为浮游藻类的存在，引起吸收系数 a^* 显著的变化。因此，由于 b^* 的增加，绿光反射率就提高了。

在蓝区，叶绿素有强烈的吸收性能。浮游藻类引起吸收系数 a^* 的增加，比反向散射系数 b^* 的增加大得多。于是，在光谱的蓝区，反射率 R_∞ 降低了。人们正是根据卫星传感器得到的在绿区增强（或在蓝区减弱）的光学信号，来确定海洋叶绿素的浓度。

4. 转折点

不同浓度的一种藻类，有一族光谱反射率曲线。如图10所示。颗石藻的光谱反射率曲线，在光谱的蓝区与绿区之间，波长为505毫微

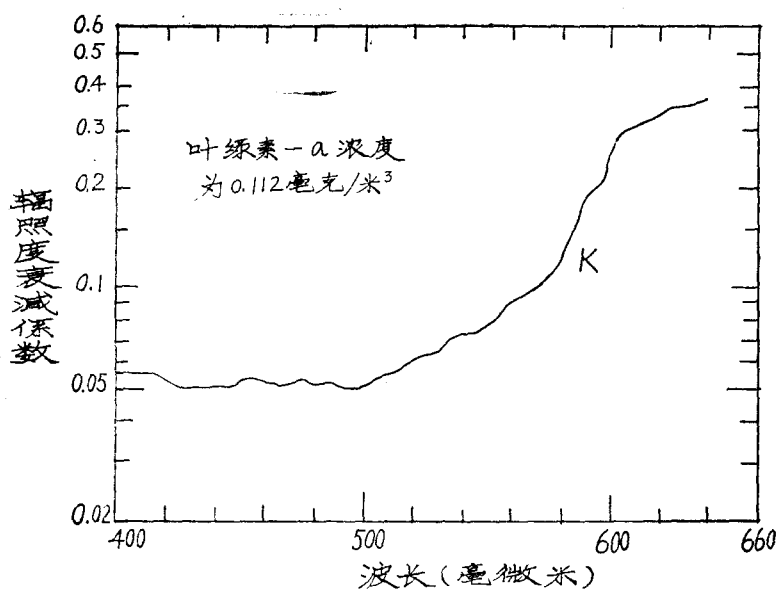


图3 清澈的海水的辐照度的衰减系数

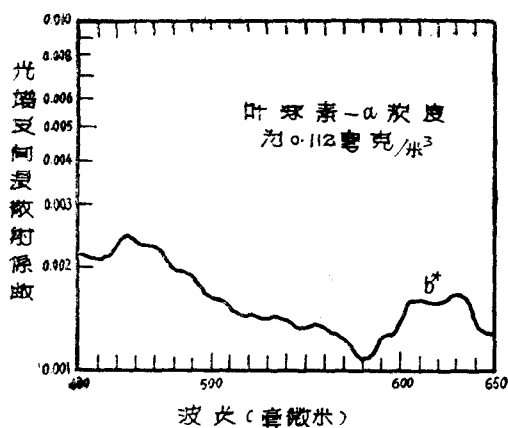


图4 本底水的光谱反向漫散射系数 b^*

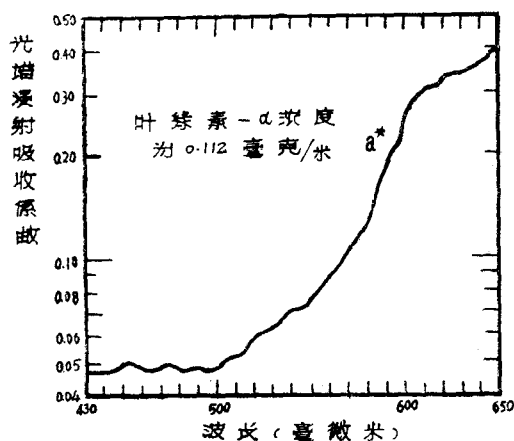


图5 本底水的光谱漫射吸收系数 a^*

米处，颗石藻的 b^*/a^* 的值与本底水的 b^*/a^* 的值相同。加入这种藻类，并不改变该波长处的反射率。因此，在该波长处，形成了一个转折点。

各种藻类的转折点的波长是不同的。因此，用遥感的方法，不仅能够测定叶绿素的浓度。还能判断占优势的是那一种藻类。

通常，在一定时间、在一个浮游植物的水花中，只有一种藻类占优势。在一族光谱反射率曲线中，呈现一个转折点。

如果各光谱反射率的曲线族呈现几个转折点，通常说明在不同时间、或不同位置有不同品种的藻类。

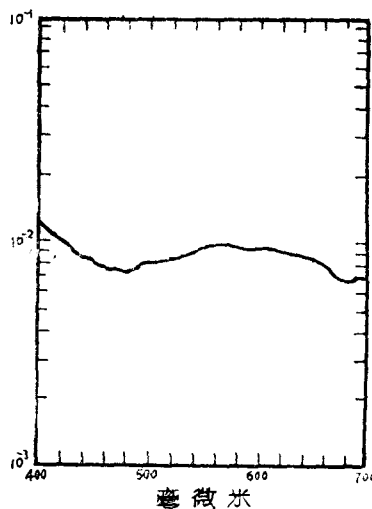


图6 颗石藻的光谱漫反射率

悬浮在海水中的碎屑，强烈地散射光线，提高整个光谱区的 b^* 值，但对 a^* 值只有微弱的影响。因此，这种碎屑使整个波长范围光谱反射率提高，也导致转折点的移动。但是，碎屑的影响，可以从光谱反射率曲线的形状区分开来。

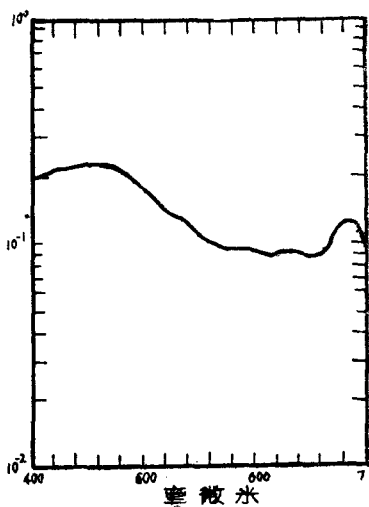


图7 颗石藻的光谱漫射光密度

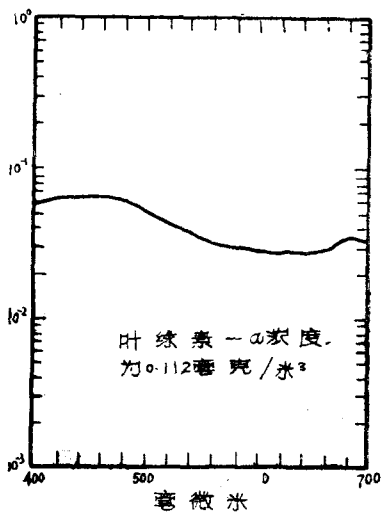


图8 颗石藻的光谱反向散射系数 b^*

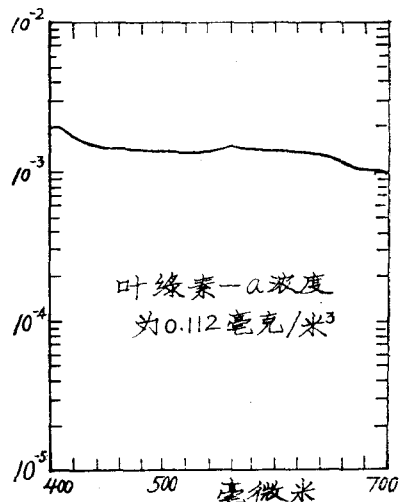


图9 颗石藻的光谱漫射吸收系数 a^*

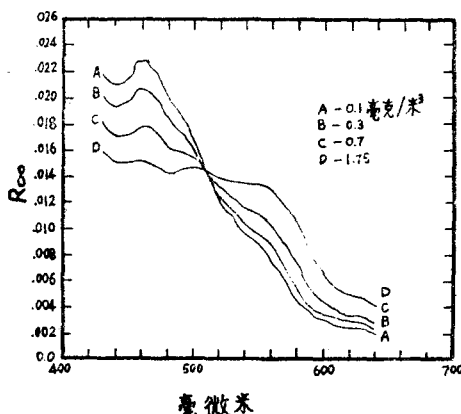


图10 颗石藻四种叶绿素-a浓度的水下光谱反射率

二、大气层数据

如上所述，可以通过海水光谱反射率，测定海洋叶绿素-a的浓度。但这种海面信号，在到达卫星传感器之前，经过了大气层的衰减。为了判读到达卫星传感器的叶绿素信号，需要测量一系列大气层数据，建立一个大气层数据存储器，用电子计算机进行大气层数据的修正。

大气层数据的测量工作是在飞机上、飞船上、船上以及地面站上进行的。用于测量大气层数据的飞机，上面装有各种测量光学和气象学参数的仪器。例如，绘制飞机上天气图的扫描仪。在海表面上，低空扫描仪绘制水表面图，同时记录太阳光、天空光的反射情况。飞机在前进的道路上时而向上，时而向下倾斜，所有的光学传感器协同工作，测量低空大气层对信号的衰减。这些数据，用地面站上的对比度衰减仪测量的数据加以补充。对比度衰减仪从地面站测量通过大气层，也就是从地球表面到卫星轨道的信号衰减。

三、表观轨道对比度

表观轨道对比度是在卫星轨道高度，测量有叶绿素的水体与本底水的信号对比度。

表观轨道对比度C的计算:

$$C = \frac{N_T - N_B}{N_B}$$

N_B ——本底水在卫星轨道高度的表观光谱辐射信号

N_T ——含有浮游藻类水体的信号

表观轨道对比度是遥感海洋叶绿素的中心问题。

表观轨道对比度的计算程序示于图11。

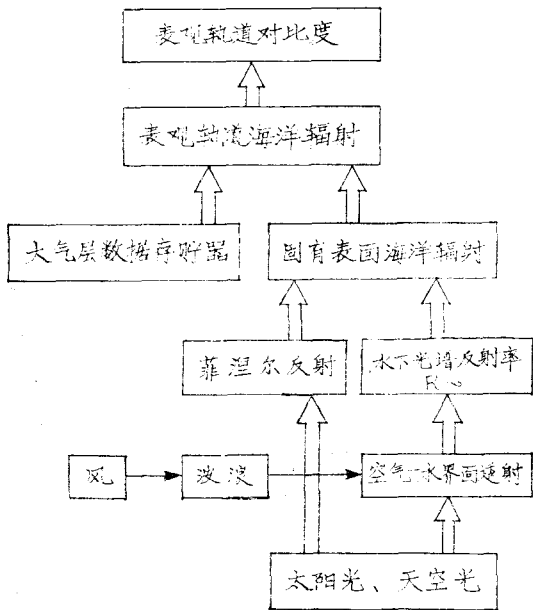


图11 表观轨道对比度的计算程序

典型的的结果示于图12。这是一张在沿轨道飞行的飞船下直接观测的极坐标图。假设在太阳平面两侧，天空辐射和地面信号是对称的，因此，可以用图的一半来表示。象底点在圆的中心。以象底点为圆心的虚线表示向下观测的象底角。最外层的象底角为60°。从900公里卫星轨道高度观察，这是近似的水平位置。极坐标图描述了从轨道高度观察到的地球表面总的景物。图12是叶绿素-a浓度为0.3毫克/米³，均匀分布在水表面以下50米的水层，颗石藻的表观轨道对比度。

图上反映了一个情况，当太阳天顶角为30.9°时，海洋表面的太阳反射点距象底点约30°。

海洋颜色传感器要求有足够的灵敏度。当传感器从贫瘠的水域扫描到含有一定叶绿素浓度的水域，要求传感器能够检测出光学输入0.001的变化。

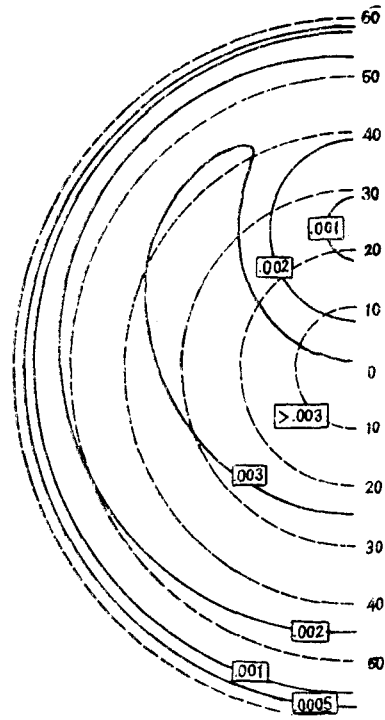


图12 表观轨道对比度

绿光(560毫微米)
叶绿素-a浓度: 0.3毫克/米³
样品: 颗石藻
晴天, 风速10级
太阳天顶角: 30.9°

图12的粗黑线表示出，除去邻近太阳反射点和视域的边界，在视域的绝大部分，光学输入大于0.001。

图13表示了太阳平面内，六个太阳天顶角(24.3°, 30.9°, 42.0°, 51.6°, 62°, 70.60°)叶绿素浓度为0.30毫克/米³的颗石藻的轨道信号水平。

从图13可以得到以下的结论：当太阳天顶角为30.9°时，具有最大的光学信号，但角宽度不如24.3°那样好。当太阳天顶角超过42.0°时，信号水平下降。根据上述曲线反映的情况，从信号水平和角宽度综合考虑，太阳天顶点以30°或小于30°为好。

为地球卫星传感器设计的视域，以角直径量为 50° ，这样可以更好地配置传感器的视域，使它离开太阳反射点。因为那里的信号最小。以图12为例，如将视域配置在靠近太阳一边的 5° 至离开太阳一边的 45° 区域，可以得到最好的信号水平。

图14表现了一个朦朧的天气测量计算的结果。天空是蓝色的，但水平面上有一层薄雾，地平线呈灰色。大气的光学性质使整个视域的表现对比度降低，但由于注意了传感器的视向，表现轨道对比度仍超过0.001。

图14描述了用560毫微米绿光测定叶绿素-a的情况。而从图10可以看出，叶绿素-a的光谱效应，水下光谱反射率在蓝区降低的幅度，大于在绿区升高的幅度。另一方面，大气对光的散射，通常蓝光比绿光衰减的宽度大。因此，可以得到一个重要的推论：蓝光信号可以应用于遥感测定。研究的结果表明：无论是晴朗的日子还是迷朦的天气，蓝光的叶绿素信号大于绿光信号。

上述表现轨道对比度的测量和计算，条件

是大气层无云，在整个视域，大气层的光学性质完全一致。很明显，这样的情况不是经常会遇到的。对将来可能会遇到的气象条件，计算机软件和大 气层数据存储器会迅速地修正气象条件引起的变化。

值得注意的是，在最佳的观测方向和太阳天顶角情况下，大气层性质对观测的结果影响很小。不管是晴朗的还是迷朦的天空，表现对比度的差别很小。

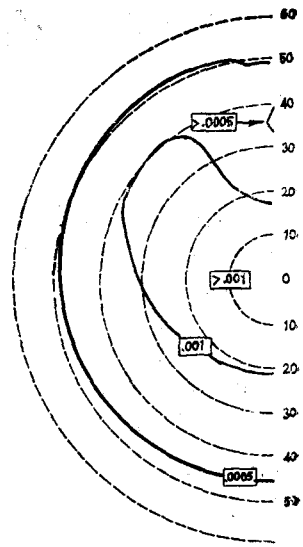


图14 表现轨道对比度
绿光 (560毫微米)
叶绿素-a浓度: 0.3 毫克/米^3
样品: 颗石藻
朦朧的天气
风速10级
太阳天顶角: 32.4°

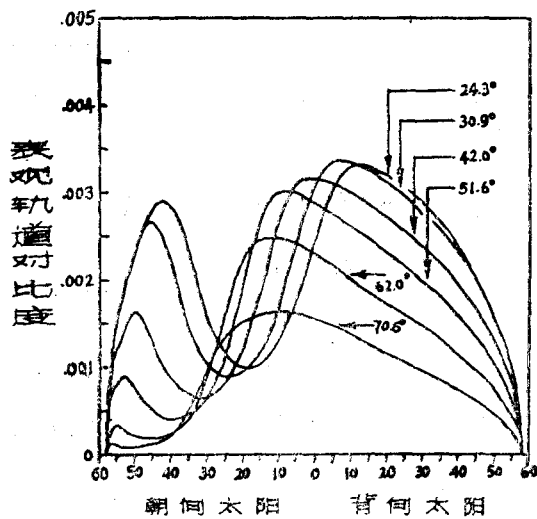


图13 不同太阳天顶角情况下的表现轨道对比度

绿光 (560毫微米)
叶绿素-a浓度: 0.3 毫克/米^3
样品: 颗石藻
晴天, 风速10级

四、结 语

海洋叶绿素的光谱效应是遥感海洋叶绿素的理论基础。通过测量本底水和样品的光学系数，用电子计算机计算出不同藻类、不同浓度的水下光谱反射率。叶绿素引起海水光谱反射率在绿区升高，在蓝区降低。利用这种光谱效应，用卫星传感器测出它的表现轨道对比度，从而计算出海水中叶绿素的含量。

表现轨道对比度是遥感海洋叶绿素的中心问题。

最佳的太阳天顶角一方面可以减少大气层因素的影响，另一方面，可以增加表现对比度信号。从信号水平和角宽度综合考虑，太阳天顶角以 30° 或小于 30° 为好。

卫星传感器对视域采取最佳的倾角——在不遗漏最高表现对比度信号部位的情况下，视域离太阳反射点愈远愈好。

(下转第12页)

类资源量的途径迈进。把鳕鱼从大西洋移殖到太平洋沿岸已取得了成功。苏联把太平洋产的鲑鳟鱼移殖到大西洋也获成效。有人设想,把冷水性的鲑鱼移到饵料丰富的南极区,可能使这种鱼的资源增殖起来。

标志放流

人们借助于标志放流来研究鱼类及其他动物的生活习性和数量,尤其是它们的洄游路线,通常用的是活鱼挂牌标志法。就是把刻有号码和机关代号的小块标牌挂在鱼体外部合适的部位,再把这样的活鱼放回水里,让它们按照自己的习性活动,过一段时间在别处重捕时,便可知道它们的洄游方向和路线。另外,根据标放量和重捕鱼的数量,结合其他因素可推算该鱼的资源量。这是长期以来广泛采用的方法。此外,也有用切除鳍条等外部组织作记号,以示踪原子进入鱼体作同位素标记。近年来,又研究发展了一些新的方法,象染料注射、低温印记,声学装置等标志法。染料注射标志法是将易辨、持久和无害的染料注入鱼体(下颌皮肤下面较好),使之呈现异常的颜色而作为标记。低温印记标志法是用金属印作的烙印器。先将这种烙印器放入低温的液体氮(-196°C)、干冰(固体二氧化碳, -79°C)中冷却,然后取出并立即烙压所要标志的对象的皮肤,由此破坏原来的色素细胞而呈现标记。这样处理的优点是动物无痛感而且标记能够终身保持。声学装置标志法是用微型超声波

发射器挂在鱼体上或塞在胃内,这样便能从鱼身所在处不断发出信号来,再从两三部接收机在不同位置接收这种信号,以测定鱼的位置和游泳速度。用这种方法所得的测定结果精度较高。最近,美国在研究银大麻哈鱼洄游路线的诱导因素时证实,气味(莫福林)是引导这种鲑鱼从远离海岸的地方游回老家的一个看不见的因素,从而提出了气味洄游理论。

种群变动

在鱼类数量变动的研究中,日益重视幼鱼补充与亲鱼数量关系问题的探讨,1970年在丹麦奥尔胡斯召开了国际的鱼类资源与补充问题讨论会。非常注意采用数理模式来表示鱼类种群的变动。对作为动物资源基本单元的种群鉴别方法,从传统的形态学、生态学以及渔业统计等方法发展到了生物化学方法。应用高分辨电泳和组织化学染色技术,来观察同工酶、蛋白质等的多型现象,进行种群判别。由于海洋污染越来越严重,可能破坏海洋生物的生态平衡,而给水产资源以强烈的影响,因此加强了对污染与海洋生物数量和质量关系问题的研究变得越来越重要了。

综上所述,世界海洋渔业资源虽然丰富,但并不是取之不尽的。我们要吸取国际渔业发展的正反经验教训,在大力发展海洋捕捞渔业的同时,要合理利用渔业资源,落实渔业增殖的有关措施,搞好海洋水产科学研究,才能尽快把我国海洋渔业生产提高到新的水平。

(上接第23页)

大气层对信号的衰减,用大气层数据存贮器和计算机软件来处理。

绿光和蓝光都可以作为遥感海洋叶绿素的信号。通常情况下,蓝光信号比绿光信号大。红光不能成为遥感叶绿素的信号,因为水分子对红光的吸收非常强烈。

目前,卫星遥感技术在各个领域的应用越来越广泛。在海洋叶绿素的遥感测定方面,也已积累了必要的资料,可供借鉴。我们应当尽快地掌握这种新技术,加速海洋初级生产力的

调查、研究,为开发我国海洋资源,作出新的贡献

参 考 文 献

- (1) 曾呈奎, 1977. 海洋科学新动向。一、水域生产力及有关问题。海洋科学 I, 1—3 页。
- (2) Austin R. W. 1974. INHERENT SPECTRAL RADIANCE SIGNATURES OF THE OCEAN SURFACE.
- (3) Duntley S. O. 1974 DETECTION OF OCEAN CHLOROPHYLL FROM EARTH ORBIT.